

CAPITULO 4

VULNERABILIDAD SÍSMICA URBANA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ

Debido al crecimiento y a la densificación de la población en centros urbanos y al desarrollo de tecnologías peligrosas en áreas donde pueden ocurrir fuertes terremotos, la ingeniería sísmica mundial ha tenido que explorar metodologías, técnicas y estrategias con el fin de mitigar o reducir el riesgo sísmico. Este término puede entenderse como las consecuencias sociales y económicas potenciales que podrían sufrir uno o varios de los elementos que componen el contexto social y material, tales como las personas, las edificaciones, la infraestructura de servicios públicos, las industrias y el comercio, entre otros.

El riesgo se obtiene de relacionar la amenaza, o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de una intensidad específica, con la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Desde el punto de vista físico, el "riesgo específico" es la pérdida esperada en un período de tiempo, que puede ser expresada como una proporción del valor o costo de reemplazo de los elementos bajo riesgo. Usualmente, el riesgo específico representa pérdida de vidas, heridos y pérdidas de inversiones de capital.

Estimar las pérdidas potenciales que puede producir un terremoto es una tarea difícil pero fundamental para estimular y generar acciones de mitigación sísmica. Un amplio número de métodos han sido propuestos para estimar pérdidas en futuros terremotos entre los cuales pueden encontrarse inconsistencias significativas. Sin embargo, si no es posible actualmente predecir con "precisión" cuándo y dónde va a ocurrir un terremoto, cuántas víctimas causará y qué daños producirá en la amplia variedad de edificios de diferentes edades y características, si es posible realizar aproximaciones y estimativos que indiquen la naturaleza y la magnitud del problema que tendrá que afrontar una ciudad o una región, razón por la cual este tipo de estudios se han convertido en ineludibles y necesarios.

4.1 METODOLOGÍA GENERAL

Las metodologías para la evaluación del riesgo sísmico de centros urbanos, consideran diferentes técnicas para analizar la amenaza sísmica y utilizan matrices o funciones de vulnerabilidad empírica para diversos tipos de

edificaciones y de líneas vitales. Estas técnicas para la estimación de escenarios de pérdidas anticipadas permiten inferir la forma mediante la cual puede mitigarse el riesgo sísmico, no sólo empleando sus resultados para la definición de planes de emergencia o de preparativos para desastres, sino también para aportar información que permita ser utilizada en la planificación física y urbana de los centros poblados en zonas sísmicas.

El alcance de los estudios y el tipo de metodología para la evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo dependen de:

- La escala del espacio geográfico involucrado.
- El tipo de decisiones de mitigación que se esperan tomar
- La información disponible, factible y justificable de conseguir.
- La importancia económica y social de los elementos expuestos
- La consistencia entre los niveles de resolución posibles de obtener en cada etapa de la evaluación.

En el caso de Santafé de Bogotá, se realizó una amplia revisión y adaptación metodológica que permitiera, de acuerdo con el tamaño de la ciudad y de la información disponible, llevar a cabo un estudio de utilidad para la Administración del Distrito Capital en términos de la planificación de la ciudad y los preparativos para la atención de una eventual emergencia sísmica. De acuerdo con la clasificación realizada por el Committee on Earthquake Engineering of the Division of Natural Hazard Mitigation of National Research Council de los Estados Unidos, este estudio puede considerarse del tipo II, III y V, (FEMA-177, 1988).

Es importante mencionar que para las evaluaciones de vulnerabilidad y riesgo sísmico deben realizarse modelaciones para obtener estimaciones descriptivas en forma de escenarios cuyos valores corresponden a "ordenes de magnitud" del tipo de situaciones que dichos escenarios representarían. Cada valoración tiene aso-



ciadas incertidumbres que se derivan de diferentes fuentes. Primero, en la intensidad del movimiento del suelo y los efectos colaterales o fallas en el mismo para un evento dado. Segundo, en el daño estimado causado por la intensidad del movimiento del suelo o sus efectos colaterales. Tercero, en la estimación de las pérdidas asociadas al daño en un elemento expuesto. Finalmente, existe incertidumbre en el proceso de inventario del número de elementos expuestos, en la clasificación de los mismos y en el área geográfica en la cual están ubicados. No obstante se realizó, con un esfuerzo adicional, un análisis siempre más preciso en cada caso, de todas maneras es inevitable que existan incertidumbres en estudio práctico de esta naturaleza, por esta razón se debe delimitar su alcance y su responsabilidad técnica asociada, definiéndolas de manera explícita:

ESTE ESTUDIO HA SIDO REALIZADO EXCLUSIVAMENTE PARA PROPÓSITOS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO. TOMA DE CONCIENCIA Y PLANIFICACIÓN PARA LA ATENCIÓN DE POSIBLES EMERGENCIAS ORIGINADAS POR TERREMOTOS. SUS ESTIMACIONES SON HIPOTÉTICAS Y ESTÁN BASADAS EN QUE LOS SIGUIENTES HECHOS SE PRESENTEN: 1. LA OCURRENCIA DE UN SISMO CON LAS MISMAS CARACTERÍSTICAS QUE LOS PROPUESTOS. 2. QUE SE EXPERIMENTE UN MOVIMIENTO DEL SUELO COMO LOS DESCRITOS PARA CADA ESCENARIO ESTUDIADO. 3. QUE SE PRESENTEN DAÑOS EN ALGUNOS ELEMENTOS EXPUESTOS Y EN OTROS NO POR LO TANTO, UN TERREMOTO DE CARACTERÍSTICAS DIFERENTES PODRÍA GENERAR CONSECUENCIAS MARCADAMENTE DISTINTAS A LAS PROYECTADAS CON LOS PATRONES DE DAÑOS Y PERDIDAS UTILIZADOS EN ESTE ESTUDIO.

Considerando el proceso de agregación de una metodología como la desarrollada para evaluar los potenciales escenarios de pérdidas por terremoto, es importante mencionar que en un sitio en el cual no existe la forma de llevar a cabo una calibración con base en un sismo significativo reciente, como lo es Santafé de Bogotá, el nivel de incertidumbre puede llegar a ser equivalente a un factor del orden de 5 para la estimación de los daños y de 10 para la estimación del número de víctimas¹. No obstante, las estimaciones obtenidas tienen un especial significado para la toma de conciencia, la reducción de riesgos y los preparativos para la atención de emergencias.

Finalmente, es importante mencionar que no se han realizado estimaciones de pérdidas directas para amenazas colaterales o de segundo orden, tales como desplazamiento de fallas en superficie, deslizamientos,

licuación de suelos ni de pérdidas indirectas causadas por incendios o escape de sustancias tóxicas. El alcance de este estudio no considera evaluaciones del impacto social ni de costos de rehabilitación y reconstrucción.

4.2 VULNERABILIDAD DE LAS EDIFICACIONES

Un análisis del potencial de daños se realizó llevando a cabo una identificación del tipo de edificaciones que se han construido en la ciudad desde su fundación. Para el efecto fue necesario hacer una revisión del crecimiento histórico de Santafé de Bogotá y de la manera como las tecnologías de construcción se fueron modificando con el pasar del tiempo. Por otra parte y teniendo en cuenta que las tipologías de construcción también cambian de acuerdo con la capacidad económica, fue necesario hacer un análisis de los estratos socioeconómicos y de la información que en relación con las zonas de uso, limitación de altura de las edificaciones y zonas de tratamiento que tiene la Secretaria de Planeación de la ciudad. Finalmente, con base en información sistematizada del Catastro Distrital y la amplia verificación en el campo realizada por cuadrillas de evaluadores se logró desarrollar una base de información que permitiera conocer qué tipo de tipologías de edificaciones son las más comunes en la ciudad y la manera como están distribuidas en cada una de las manzanas, barrios y sectores de la ciudad.

El inventario de edificaciones se realizó inicialmente con base en la información facilitada por un amplio número de entidades del sector público y privado. Se obtuvieron planos, estadísticas, documentación poblacional, proyectos e investigaciones específicas, algunas de las cuales se relacionan a continuación:

- Tasas de crecimiento poblacional por estratos y por barrios.
- Tasas de expansión urbana.
- Registros de fundación de barrios.
- Diferentes fuentes de ingreso económico y poder adquisitivo de la población.
- Evolución de la construcción en Bogotá.
- Evolución de los procesos constructivos y calidad de la mano de obra.
- Evolución del casco y perímetro urbano.
- Crecimiento de la red vial.

¹ Un factor de 5 puede interpretarse para el caso de una buena estimación de 1000, como que el valor puede encontrarse dentro de un rango de sobre o infra estimación de 400 a 2000.

- Proyección de la red vial actual hasta el año 2010
- Información acerca de construcciones en proceso.
- Plano sobre zonas no reglamentadas y zonas marginales.
- Identificación de edificaciones gubernamentales, edificaciones indispensables y sitios estratégicos.
- Estratificación socio-económica.
- Características y evolución de los materiales de construcción.
- Estudios sobre vivienda.
- Información acerca de programas de vivienda social.

Esta información se analizó cuidadosamente en conjunto con la suministrada por la Secretaría de Planeación Distrital y el Centro Distrital de Sistematización y Servicios Técnicos, la cual sirvió de base general para la tipificación de las edificaciones y la determinación de las características relevantes para el estudio mediante visitas de campo a los sitios de mayor diversidad por parte de los grupos técnicos de identificación y verificación.

Teniendo en cuenta que las propiedades dinámicas y las características de resistencia, rigidez y disipación de energía inelástica de las edificaciones ante los terremotos varían notablemente dependiendo del tipo de material del sistema estructural, altura, técnica de construcción, edad y otros factores; se consideraron las siguientes tipologías y características para el caso de Santafé de Bogotá:

TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL

- (1) MAMPOSTERÍA 1-2 PISOS
- (2) MAMPOSTERÍA MAYOR O IGUAL A 3 PISOS
- (3) PÓRTICOS MENORES O IGUALES A 5 PISOS
- (4) PÓRTICOS 5-10 PISOS
- (5) PÓRTICOS MAS DE 10 PISOS
- (6) BODEGA LIVIANA
- (7) BODEGA PESADA
- (8) INFORMAL LIVIANA
- (9) INFORMAL PESADA
- (10) OTROS

USO

- (1) RESIDENCIAL
- (2) COMERCIAL
- (3) EDUCATIVO
- (4) SALUD
- (5) INSTITUCIONAL
- (6) FABRIL E INDUSTRIAL
- (7) OTROS

TIPO DE CUBIERTA

- (1) LIVIANA
- (2) TEJA DE BARRO
- (3) LOSA DE CONCRETO

AÑO DE CONSTRUCCIÓN

- (1) POSCODIGO
- (2) MODERNA
- (3) PREMODERNA

ENTREPISOS

- (1) CONCRETO
- (2) MADERA
- (3) OTROS

MANTENIMIENTO

- (1) BUENO
- (2) REGULAR
- (3) MALO

Es importante notar que este tipo de clasificación se definió de acuerdo con las características arquitectónicas y constructivas observadas del conjunto general de edificaciones de la ciudad. No menos del 85% de la población se encuentra alojada en edificaciones de uno y dos pisos típicamente de mampostería. Un amplio número de los conjuntos multifamiliares tienen como límite superior cinco pisos debido a la reglamentación urbana y a los requerimientos de ascensores en los edificios. Los edificios con estructuras metálicas no se consideran como una tipología adicional, ya que al momento de llevar a cabo este trabajo sólo se habían construido en la ciudad cerca de 30 edificios aporticados en acero

FACTOR DE DAÑO	RANGO DE DAÑO %	FACTOR CENTRAL DE DAÑO
Ninguno	0	0
Leve	(0-1)	0.5
Ligero	(1-10)	5
Moderado	(10-30)	20
Fuerte	(30-60)	45
Severo	(60-100)	80
Destrucción	100	100

TABLA 4.1 ESTADOS DE DAÑO

El levantamiento de la información consistió en identificar en cada una de las manzanas de la ciudad las tipologías de las edificaciones, determinar la cantidad de área construida aproximada de las mismas y sus principales características. Utilizando los planos más recientes de la ciudad, elaborados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi a escala 1:2000, y con la ayuda de una planilla debidamente diseñada para el efecto se identificaron, la manzana, el número de la edificación y sus características. Para efectos de determinar la altura de las edificaciones se utilizaron fotografías aéreas laterales similares a las publicadas en el libro "Bogotá desde el Aire" de Villegas Editores, (Horney et al, 1994), las cuales permitían conocer la altura de las edificaciones por el ángulo en que fueron tomadas, a diferencia de las fotografías aéreas típicas. Igualmente se utilizó información de la Secretaría de Planeación y el Catastro Distrital, y finalmente de las visitas de los grupos técnicos de verificación que recorrieron la ciudad, realizando inspecciones manzana por manzana en las zonas donde la heterogeneidad de las tipologías así lo ameritaban.

En total se cubrió un área de 405 km² sobre un perímetro de la ciudad del orden de 92 km. Algunas tomas aéreas laterales muestran la heterogeneidad de la zona centro-oriente de la ciudad y la homogeneidad del sur, el occidente y el nor-occidente, debido al patrón repetitivo de las edificaciones a nivel de la vivienda informal o de los complejos de vivienda multifamiliares de bloques de varios pisos o unifamiliares en urbanizaciones o conjuntos cerrados

Una vez obtenida la información por manzanas se llevó a cabo una sectorización de la ciudad por "celdas", las cuales pasaron a ser las unidades de análisis del estudio, con el fin de presentar la información adecuadamente mediante un sistema de información geográfica. En cada celda la aceleración del suelo se consideró constante y se trató de mantener cierta homogeneidad de acuerdo

con la distribución de las tipologías estructurales; además, sus perímetros se hicieron coincidir en su mayor parte con límites físicos existentes tales como vías principales, ríos y parques, con los límites de la sectorización de las alcaldías menores de la ciudad.

4.2.1 Funciones de vulnerabilidad

Con el fin de determinar los diferentes niveles de daño que puede presentar una edificación, se adoptó la metodología ya ampliamente generalizada que propuso el ATC-13/FEMA (Applied Technology Council, 1985) basada en *Estados de Daño*, los cuales han sido obtenidos para diferentes relaciones de demanda contra capacidad tanto a nivel de rigidez, resistencia y disipación de energía inelástica y que cubren todas las posibilidades de daño que pueden presentarse ante la ocurrencia de un movimiento sísmico. Los estados de daño los presenta la Tabla 4.1.

De donde cada estado de daño significa:

<i>Ninguno</i> :	<i>Sin daño</i>
<i>Leve</i> :	Daño mínimo que no requiere reparación.
<i>Ligero</i> :	Daño menor localizado en algunos elementos que generalmente no requiere reparación
<i>Moderado</i> :	Daño menor localizado en muchos elementos que deben ser reparados.
<i>Fuerte</i> :	Daño extensivo que requiere reparaciones mayores.
<i>Severo</i> :	Daño grave generalizado que puede significar su demolición.
<i>Destrucción</i> :	Destrucción total o colapso.

Estos valores de probabilidad de daño para cada valor de intensidad sísmica propuestos por el método ATC-13/FEMA, son basados en las matrices de probabilidad de daños desarrolladas por Whitman et al (1973) y Martel (1964), aplicando la técnica estadística del Método Delphi, en el cual se utilizó el criterio y las apreciaciones de un amplio grupo de expertos. Dichas matrices de probabilidad permiten deducir unas funciones de vulnerabilidad para ciertos valores de intensidad, en las cuales cada estado de daño puede expresarse en términos físicos.

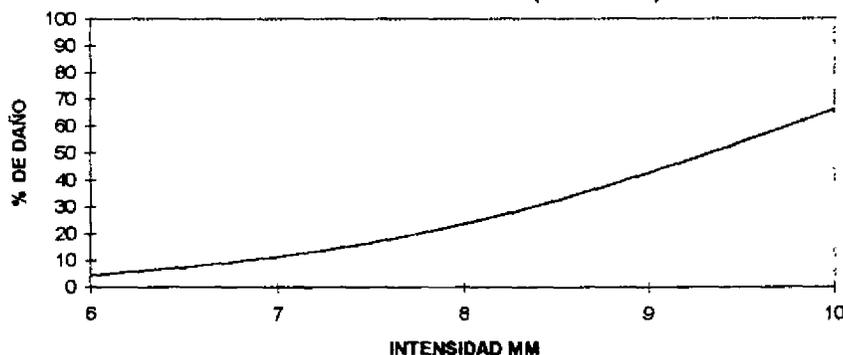
De acuerdo con lo anterior, utilizando la ecuación de Trifunac et al (1975) que relaciona la Intensidad MM y la aceleración pico del suelo y llevando a cabo una revisión de las diferentes funciones de vulnerabilidad desarrolladas por varios autores como Algermissen et al (1984), Steinbrugge (1982), Sauter et al (1978), Petrovsky et al (1985) y Ordaz (1994), se ajustaron las matrices de daños propuestas por el ATC-13/FEMA para el caso de las tipologías de edificación definidas para Santafé de Bogotá. En la Figura 4.1 se presenta a manera de ejemplo una de las matrices de probabilidad de daño para cada intensidad y la función de vulnerabilidad respectiva.

Para el caso de Santafé de Bogotá, el valor de la amenaza sísmica en cada zona de la ciudad está representado por un espectro de aceleración obtenido para cada sismo postulado, sea éste el sismo lejano o los previstos en la falla Frontal (moderado y fuerte). En consecuencia, para conocer el valor de aceleración espectral al cual está sometida cada tipología de edificación fue necesario estimar el período fundamental de vibración de cada una. Ahora bien, utilizando el método desarrollado por Scholl et al (1982) para relacionar valores de aceleración espectral e intensidad teniendo en cuenta tres tipos de suelo similares a los que se encuentran en Santafé de Bogotá y 546 acelerogramas de terremotos registrados en todo el mundo desde 1933 a 1979, se realizó un procedimiento de correlación que permitió finalmente, conocidos los valores de aceleración espectral, utilizar las funciones de vulnerabilidad modificadas, que fueron desarrolladas para valores de intensidad en la escala de Mercalli Modificada.

4.2.2 Estimación del riesgo

Para la modelación de los escenarios de daños y pérdidas se desarrolló una aplicación de computador que se le denominó Sistema de Evaluación de Riesgo Sísmico SERS, el cual se ajusta de una manera adecuada a la información recolectada y al nivel de resolución adoptado.

FUNCION DE VULNERABILIDAD MODIFICADA
MAMPOSTERIA (1-2 PISOS)



FACTOR DE DAÑO	RANGO	FACTOR CENTRAL	INTENSIDAD MERCALLI MODIFICADA				
			6	7	8	9	10
Leve	(1-10)	0.5	9.1	0.6	0	0	0
Ligero	(1-10)	5	90.5	55.5	10.9	0.5	0
Moderado	(10-30)	20	0.4	43.4	66	22.4	2
Fuerte	(30-60)	45	0	0.5	22.9	65.9	35
Severo	(60-100)	80	0	0	0.2	11.2	62.5
Destrucción	100	100	0	0	0	0	0.5
		%=	4.65	11.68	24.21	43.12	66.65

FIGURA 4.1 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD

La filosofía básica del programa, consiste en crear una base de datos a partir de los archivos de las hojas electrónicas, elaborados en la etapa de recolección de información, con el fin de poder llevar a cabo los cálculos con toda la información en conjunto. El programa permite la creación de celdas y familias de celdas con la información de las edificaciones. A manera de tabla, se le introduce la información de las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada una de las tipologías y el valor de la amenaza sísmica de entrada se le incorpora de acuerdo con los valores de aceleración espectral estimada para cada celda, según la microzonificación sismogeotécnica y el tipo de terremoto, que como ya se mencionó corresponde a un sismo lejano del tipo subducción y dos sismos en la falla Frontal de la Cordillera Oriental; uno moderado y otro fuerte

De esta manera el programa permite obtener evaluaciones de carácter estadístico sobre el número de habitantes, área construida de tipos de edificación, usos, etc. y estimaciones de riesgo sísmico obtenidas de la convolución de la amenaza sísmica y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, como área dañada, costos de reposición, heridos leves o graves y pérdidas de vida. Este tipo de estimaciones se pueden obtener para cualquier nivel o unidad de información requerida, es decir, para una celda, una familia de celdas (sector) o para un grupo de celdas señalado.

Desde el punto de vista metodológico, la matriz de relaciones de daño se obtuvo utilizando el Factor de Daño Medio, *Mean Damage Factor* (MDF), calculado para cada intensidad y la tipología de edificación considerada. El MDF para una tipología "T" sometida a una intensidad "I" está dado por:

$$MDF(T,I) = \sum_{DS=1}^n P_{DSI} \times DR_{DS} \quad \text{Ec. 4.1}$$

donde :

DS = Estado de Daño (*Damage State*) de 1 (ninguno) a 7 (destrucción).

P_{DSI} = Probabilidad de daño para un DS dado de una tipología de edificación "T" y para una intensidad "I".

DR_{DS} = Relación de daño (*Damage Ratio*) para un DS dado.

Por lo tanto la matriz de relaciones de daños, tiene la siguiente forma:

$$\begin{matrix} \left| \begin{array}{ccc} MDF_{1,1} & \dots & MDF_{1,L} \\ \dots & MDF_{I,j} & \dots \\ MDF_{K,1} & \dots & MDF_{K,L} \end{array} \right|_{K \times L} \end{matrix}$$

donde :

$MDF_{i,j}$ = Mean Damage Factor (MDF) para la tipología i a una intensidad j.

K = Número de tipologías de edificación bajo consideración

L = Número de niveles de aceleración sísmica considerados.

Las Figuras 4.2 a 4.5 ilustran el área de construcción dañada y las pérdidas económicas directas obtenidas como un porcentaje del costo de reposición para cada tipología de edificación, considerando los dos escenarios más graves de amenaza sísmica para la ciudad.

Para efectos de estimar la cantidad de personas que pueden presentar heridas e incluso la muerte, se utilizaron estimativos similares a los propuestos por Whitman et al (1973) y ajustados en el ATC-13/FEMA, que son en general aceptados para los países occidentales. Las Figuras 4.6 a 4.9 presentan una distribución de heridos y de posibles pérdidas de vida para algunos de los escenarios de amenaza sísmica.

4.2.3 Análisis de resultados

Del trabajo realizado se puede concluir que aún cuando la amenaza sísmica para Santafé de Bogotá no corresponde a valores extremos en el país, el riesgo si lo es debido al alto grado de vulnerabilidad de sus edificaciones, las cuales hasta hace muy pocos años fueron construidas sin tener en cuenta criterios sismoresistentes. Sólo a partir de 1984, año en el cual se aplicó el primer estudio de amenaza sísmica en el país para efectos de expedir por primera vez el Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes CCCSR, se podría decir que las edificaciones cuentan con algún grado de protección en caso de terremoto; obviamente siempre que hayan sido construidas en forma correcta. Infortunadamente, con anterioridad a 1984 no se tuvieron requerimientos para soportar sollicitaciones dinámicas y cargas laterales, razón por la cual las edificaciones diseñadas y construidas antes de ese año en su mayoría son altamente vulnerables, como lo han demostrado sismos incluso mucho menores a los de diseño en otras zonas del país.

Es importante mencionar que en los últimos años el estado del arte de la ingeniería sísmica ha cambiado, en cuanto a normativa sismoresistente, del criterio de proteger solamente la vida hacia el criterio de proteger, al